

Преобразование токов перемежающегося дугового замыкания в информационные сигналы для защиты от однофазного замыкания на землю

- **Максимова М. Н.¹**, ООО НПП “ЭКРА”; Чувашский государственный университет им. И. Н. Ульянова, Чувашская Республика, Чебоксары
- **Антонов В. И.**, доктор техн. наук, ООО НПП “ЭКРА”; Чувашский государственный университет им. И. Н. Ульянова, Чувашская Республика, Чебоксары
- **Солдатов А. В.**, ООО НПП “ЭКРА”; Чувашский государственный университет им. И. Н. Ульянова, Чувашская Республика, Чебоксары
- **Наумов В. А.**, ООО НПП “ЭКРА”; Чувашский государственный университет им. И. Н. Ульянова, Чувашская Республика, Чебоксары
- **Иванов М. О.**, ООО НПП “ЭКРА”; Чувашский государственный университет им. И. Н. Ульянова, Чувашская Республика, Чебоксары

Традиционные защиты от перемежающихся замыканий на землю в электрических сетях с изолированной нейтралью обладают недостаточной устойчивостью функционирования, поскольку основаны на измерении пикового значения импульсного тока. Рассматриваются новые способы аналогового преобразования импульсов тока перемежающегося дугового замыкания в информационные сигналы, представляющие собой нормированные сигналы. Аналоговые преобразования входного сигнала защиты должны быть осуществлены до тракта аналогово-цифрового преобразователя (АЦП). Новые методы преобразования входного сигнала защиты позволяют повысить устойчивость функционирования защиты, не прибегая к высокой частоте дискретизации.

Ключевые слова: однофазное замыкание на землю, перемежающееся дуговое замыкание, линейное преобразование сигнала, нелинейное преобразование сигнала, защита от однофазных замыканий на землю.

Замыкания на землю в электрических сетях 6 – 35 кВ вначале проявляют себя как неустойчивые дуговые замыкания [1], а затем переходят в устойчивые. Поэтому защита от замыкания на землю должна надёжно выявлять как устойчивые, так и неустойчивые замыкания на землю.

Неустойчивые замыкания на землю сопровождаются кратковременными значительными импульсами тока, обусловленными разрядом ёмкостей линии, и часто называются перемежающимися замыканиями. Классические защиты от перемежающихся дуговых замыканий на землю настраиваются на измерение различных характеристик самого импульса тока замыкания. Для реализации таких алгоритмов защита должна иметь тракт аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) с высокой частотой дискретизации, что значительно усложняет их исполнение. Кроме того, необходимость выявления кратковременного импульса тока снижает надёжность работы таких защит и делает их функционирование зависимым от параметров защищаемого участка электрической сети.

Очевидно, что преодоление недостатков классических защит возможно только при использовании новых принципов преобразования входных сигналов при перемежающихся дуговых замыканиях. В этой связи авторы видят дальнейшее их развитие в применении методов преобразования импульсных токов в нормированные информационные сигналы. Применение новых способов позволит повысить устойчивость функционирования существующих защит и разработать на их базе более совершенную цифровую защиту от перемежающихся дуговых замыканий на землю. Именно этой теме посвящена настоящая работа.

В первом разделе статьи излагаются особенности сигналов при замыкании на землю, во втором – описываются классические алгоритмы защит от перемежающихся дуговых замыканий и основные принципы преобразования импульса тока перемежающегося замыкания. Далее предлагаются новые методы преобразования входного сигнала защиты, основанные на преобразовании нестабильных импульсов тока в нормированные информационные сигналы.

¹ Максимова Мария Николаевна: maksimova_mn@ekra.ru

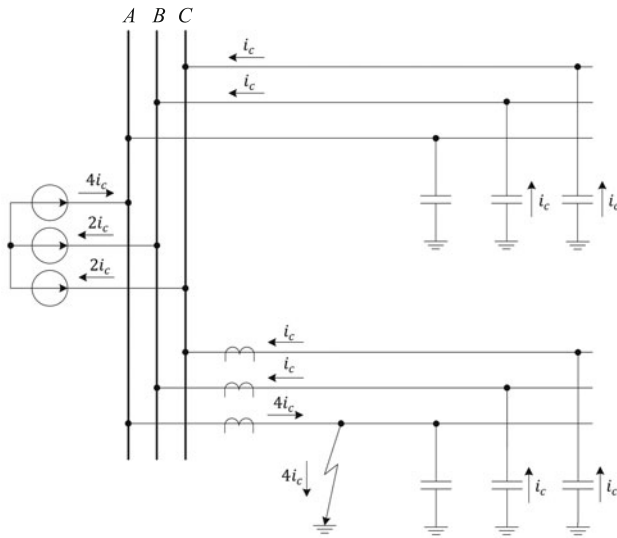


Рис. 1. Распределение токов устойчивого ОЗЗ в электрической сети

Особенности сигналов при замыкании на землю

В установившемся режиме металлического устойчивого однофазного замыкания на землю (ОЗЗ) в электрической сети с изолированной нейтралью в месте измерения присутствует только синусоидальный ток установившегося режима, состоящий из двух составляющих: тока нагрузки и тока замыкания. Установившийся ток ОЗЗ i_c растекается по ёмкостям неповреждённых фаз фидеров и возвращается через источник по повреждённой фазе от шины к месту повреждения (рис. 1). Поэтому ёмкостный ток повреждённой фазы фидера при устойчивом ОЗЗ превосходит ток неповреждённой фазы в 4 раза. Именно это соотношение между токами повреждённой фазы и неповреждёнными фазами обычно кладётся в основу принципа действия защит от устойчивого ОЗЗ [2 – 4].

Переमेжающееся замыкание характеризуется быстропротекающей переходной составляющей, вызванной разрядом ёмкостей фидеров. Ток неустойчивого замыкания i_t в этом случае представляет собой значительный импульс (рис. 2), длительность которого составляет единицы миллисекунд [5]. При этом через повреждённый фидер на фоне тока нагрузки протекает импульсный ток разряда ёмкостей всех фидеров, кроме ёмкости повреждённой фазы фидера (рис. 3). В этом случае ток повреждённой фазы фидера превосходит ток неповреждённой фазы уже в 5 раз. Таким образом, импульсный характер тока – одна из главных особенностей неустойчивого замыкания.

Другой особенностью перемежающихся дуговых замыканий является периодичность их возникновения. В отечественной литературе сформировалась следующая классификация неустойчивых замыканий на землю: однократные самоустраняющиеся, прерывистые и перемежающиеся за-

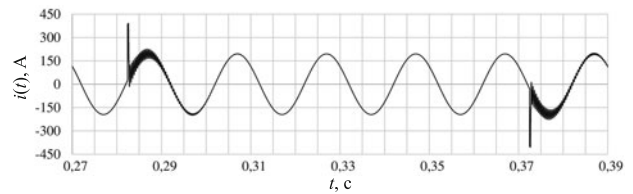


Рис. 2. Ток повреждённой фазы при перемежающемся ОЗЗ. Ток замыкания (импульсный ток) i_t , представлен на фоне тока нагрузки

мыкания [6]. Однократные самоустраняющиеся замыкания связаны с пробоем изоляции, не представляющим особой опасности для сети. Для прерывистых замыканий характерна непериодическая последовательность самоустраняющихся замыканий через большие интервалы времени. Если интервал между повторными замыканиями уменьшается до 100 мс, то такие замыкания считаются перемежающимися.

Существуют три наиболее известные модели горения дуги при перемежающихся замыканиях: модели Петерсена [7, 8], Петерса и Слепяна [9], Белякова [10]. Согласно модели Петерсена, время горения электрической дуги составляет полпериода свободных колебаний, и дуга гаснет при первом же прохождении кривой импульса тока через нуль. Повторные зажигания дуги происходят в моменты достижения напряжением на повреждённой фазе максимального значения. Модель по Петерсу и Слепяну подразумевает горение дуги до момента перехода через нуль кривой тока промышленной частоты, а повторные зажигания дуги происходят регулярно через каждый период. Модель Белякова занимает промежуточное положение между моделью Петерсена и моделью Петерса и Слепяна. Дуга может погаснуть как при первом, так и при любом последующем переходе через нуль высоко-

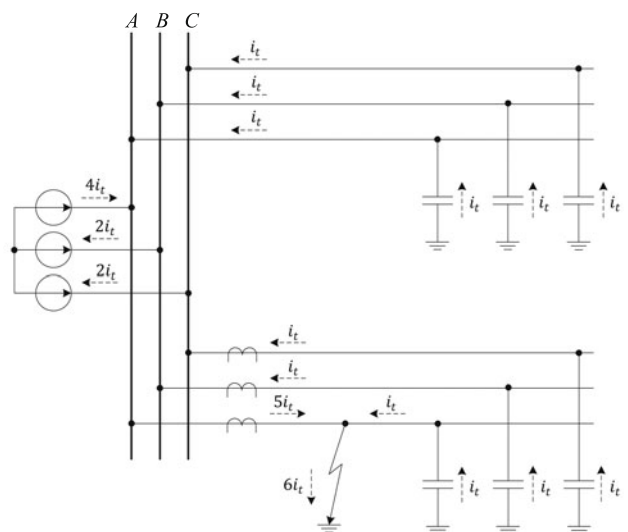


Рис. 3. Распределение импульсного тока замыкания при перемежающемся ОЗЗ

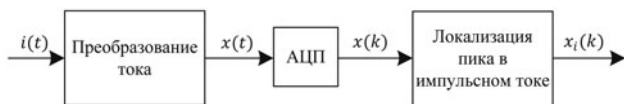


Рис. 4. Тракт измерения классических защит от перемежающихся дуговых замыканий:

$i(t)$ – ток на входе защиты; $x(t)$ и $x(k)$ – информационный сигнал защиты и его цифровой образ; $x_i(k)$ – цифровой сигнал, пропорциональный пиковому значению импульсов в токе ОЗЗ

частотного тока и тока промышленной частоты. Во всех моделях отмечается, что перемежающиеся замыкания всегда сопровождаются возникновением высоковольтных перенапряжений в неповреждённых фазах, кратность которых может достигать $3,5U_{ph}$ [6].

Нахождение сети под перенапряжением считается не только нецелесообразным, но и пагубным, поскольку впоследствии может привести к более тяжёлым повреждениям оборудования энергосистемы. Авторы работ [6, 11, 12] делят перемежающиеся замыкания на опасные и неопасные, принимая, что замыкания опасны для сети уже тогда, когда интервал между повторными замыканиями становится меньше критической величины $T_c \leq 70 \div 60$ мс. Хотя отмеченные модели горения дуги и определяют характер возникновения замыкания, время и условие погасания дуги, но не определяют частоту появления перемежающихся дуговых замыканий. И с точки зрения реализации релейной защиты рассмотренные ранее модели горения дуги равнозначны.

Таким образом, учитывая все характерные черты перемежающихся замыканий, защита должна определять повреждённый фидер, режим замыкания, измерять кратковременные импульсы тока значительной амплитуды, а также контролировать интервалы времени между повторными замыканиями.

Классические способы преобразования измеренного тока

Главная особенность возникновения дугового замыкания в сети – появление импульсов в токе фаз сети. Поэтому традиционный подход к его обнаружению основывается на локализации импульсов в токе замыкания, измерении пиковых значений импульсов тока и периодичности их возникновения [13 – 15]. Аппаратной особенностью этих защит является присутствие в них тракта АЦП с высокой частотой дискретизации (рис. 4).

Цифровое измерение импульса усложняет реализацию и понижает надёжность функционирования защиты из-за сбоев при локализации и измерении пикового значения импульсного тока. Это связано со свойством перемежающегося дугового замыкания, заключающемся в его случайном характере, а также несинхронизированностью процесса дискретизации.

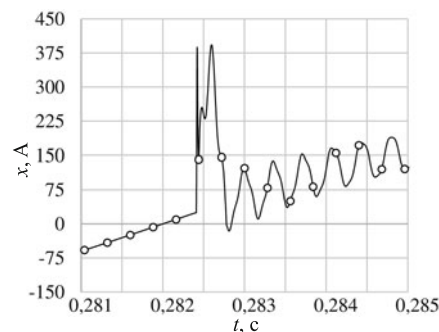


Рис. 5. К иллюстрации механизма появления погрешности в измерении пикового значения тока перемежающегося дугового замыкания:

светлые кружки – отсчёты оцифрованного сигнала $x(k)$

При оцифровке импульсного тока (рис. 2) в классических защитах отсчёт, приходящий на импульс, занимает произвольное место, и поэтому не гарантируется расположение отсчётов на пике импульса тока, т.е. амплитудное значение пика тока будет определено неверно (рис. 5).

Так или иначе цифровые защиты, принцип действия которых основан на локализации пика импульса тока и измерении его пикового значения, будут функционировать неустойчиво. Поэтому должны быть предусмотрены другие методы обработки входных сигналов защиты, позволяющие гарантированно выявить перемежающиеся замыкания и определить амплитуду импульса.

Новые методы преобразования импульса тока в нормированные информационные сигналы

Для повышения надёжности выявления перемежающегося дугового замыкания предлагается использовать аналоговое преобразование входной величины в информационный сигнал – сигнал с заданными характеристическими параметрами. Суть этих преобразований заключается в том, что непрерывный входной сигнал защиты преобразуется с помощью аналогового преобразователя ещё до АЦП (рис. 6) [16, 17].

Основное требование, предъявляемое к аналоговому преобразованию, – это сохранение информации о величине пикового значения импульса тока. Также для разграничения опасных и неопасных перемежающихся замыканий необходимо, чтобы сохранилась информация о периоде импульсов тока замыкания. Это означает, что в ин-

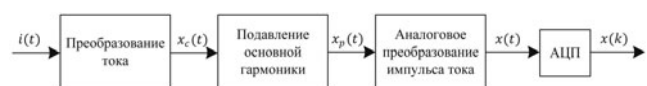


Рис. 6. Структурная схема формирования входного сигнала с помощью аналогового преобразования:

$i(t)$ – ток на входе защиты; $x_c(t)$ – сигнал после преобразования входного тока защиты; $x_p(t)$ – импульсный ток; $x(t)$ и $x(k)$ – информационный сигнал защиты и его цифровой образ

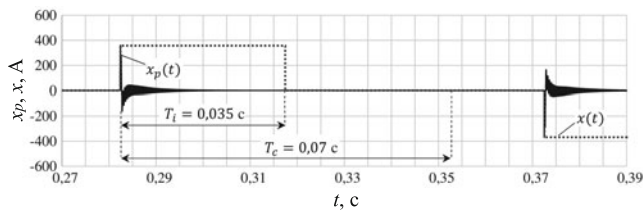


Рис. 7. Преобразование импульсов тока в нормированный сигнал при перемежающемся ОЗЗ:

$x_p(t)$ – импульсный ток (получен после удаления основной гармоники); $x(t)$ – информационный сигнал защиты

формационном сигнале будут присутствовать паузы после преобразования первичного тока.

Для исключения влияния тока основной гармоники на измерение импульса тока сначала в обоих вариантах аналогового преобразования удаляют составляющую основной гармоники с помощью специального фильтра заграждения [18]. Остаточный сигнал после преобразования будет представлять собой кратковременный импульс тока $x_p(t)$ (рис. 7), который в дальнейшем будет преобразован в нормированный сигнал $x(t)$.

Главным преимуществом аналогового преобразования импульса тока является создание условий для последующей цифровой обработки нормированного сигнала $x(t)$ стандартными методами, например, с помощью адаптивного структурного анализа [19, 20]. Предлагаемый принцип преобразования импульсного тока создаёт основу для разработки более совершенной и надёжной защиты. Методы выполнения аналогового преобразования могут быть как нелинейными [21], так и линейными [22].

Нелинейное преобразование. В качестве нелинейного преобразователя применяется аналоговый пик-детектор с возможностью сброса его выходного сигнала $x(t)$ через заданный промежуток времени T_i . В этом случае нормированный сигнал $x(t)$ будет представлять собой прямоугольные импульсы заданной длительности T_i , амплитуды которых будут пропорциональны импульсам тока $x_p(t)$ (рис. 7).

Паузы между прямоугольными импульсами в нормированном сигнале $x(t)$ предусмотрены для разграничения опасных перемежающихся замыканий от опасных. Исходя из этого, для правильного разграничения необходимо, чтобы выполнялось условие

$$T_i < T_c.$$

На рис. 7 иллюстрируется преобразование импульсного тока в нормированный сигнал пик-детектором с $T_i = 35$ мс.

Линейное преобразование. Преобразование входного сигнала защиты выполняется аналоговым фильтром с заданной импульсной характеристикой. Тогда новый информационный сигнал

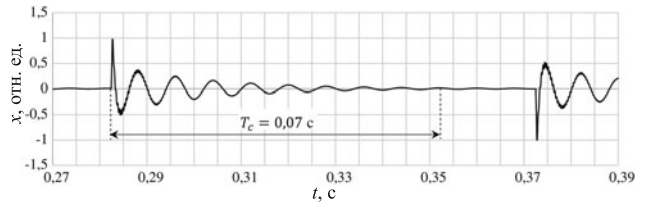


Рис. 8. Информационный сигнал в виде нормированного затухающего колебания

представляет собой реакцию на импульс тока во входном сигнале и будет иметь вид затухающего колебания (рис. 8).

Передаточная функция аналогового фильтра будет следующей:

$$H(p) = \frac{2K\alpha p}{(p + \alpha)^2 + \omega_v^2},$$

где $\omega_v = 2\pi f_v$ – резонансная угловая частота аналогового фильтра; α – коэффициент затухания; K – коэффициент усиления.

Частота колебаний импульсной характеристики определяется резонансной частотой аналогового фильтра f_v , которой соответствует вершина амплитудно-частотной характеристики (рис. 9, точка А). Рекомендуется эту частоту выбирать отличной от промышленной частоты и от кратных ей гармоник. В качестве примера на рис. 8 представлен сигнал, полученный в результате преобразования импульсного тока полосовым фильтром со следующими параметрами: резонансная частота $f_v = 125$ Гц, коэффициент затухания $\alpha = 50 \text{ с}^{-1}$, коэффициент усиления $K = 1$.

В этом варианте аналогового преобразования возможность разграничения опасных и неопасных перемежающихся дуговых замыканий также обеспечивается присутствием в информационном сигнале пауз. Это достигается выбором длительности собственного переходного процесса фильтра. Считают, что переходный процесс в фильтре длится около 3τ , ($\tau = 1/\alpha$ – постоянная времени фильтра). Поэтому, варьируя длительность переходного процесса аналогового фильтра, можно разграничить

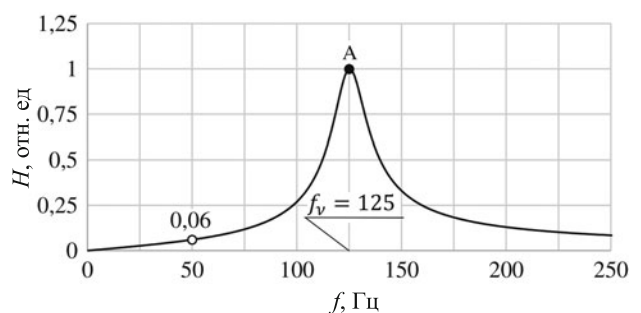


Рис. 9. Амплитудно-частотная характеристика аналогового фильтра

вид перемежающихся дуговых замыканий. Для этого необходимо выполнить условие

$$3\tau \leq T_c.$$

Таким образом, предложенные методы аналогового преобразования импульсного тока формируют информационный сигнал защиты с заданными характеристическими параметрами, причём новый сигнал содержит информацию о пиковом значении импульсного тока и периоде возникновения перемежающегося замыкания.

Выводы

1. Импульсные токи перемежающихся дуговых замыканий характеризуются кратковременностью, и классические алгоритмы защиты от замыканий на землю, основанные на измерении пиковых значений импульсов тока, не обеспечивают устойчивого функционирования при дуговых замыканиях. Аналоговое преобразование импульсов тока перемежающегося замыкания, предпринятое до измерительного тракта АЦП защиты, трансформирует импульсы тока в информационный сигнал с заданными характеристиками и тем самым искореняет недостатки классических защит.

2. Новый измерительный тракт АЦП состоит из фильтра заграждения основной гармоники и аналогового преобразователя с заданной импульсной характеристикой. В случае линейного преобразования импульсного тока аналоговый преобразователь представляет собой полосовой фильтр с заданными частотными характеристиками, в случае нелинейного преобразования – пик-детектор с конечной импульсной характеристикой.

Список литературы

1. Шуин, В. А. Влияние переходных процессов при замыкании на землю в электроустановках среднего напряжения на функционирование защит от замыканий на землю на основе высших гармоник [Текст] / В. А. Шуин, Е. С. Шагурина, О. А. Добрягина // Релейная защита и автоматизация. – 2012. – № 2 (07). – С. 28 – 32.
2. Кискачи, В. М. Новые направления выполнения селективной защиты от однофазных замыканий на землю генераторов и сетей 6 – 35 кВ [Текст] / В. М. Кискачи // Электрические станции. – 1994. – № 10. – С. 10 – 15.
3. Способ защиты генератора от замыканий на землю [Текст]: пат. 2658645 Рос. Федерация: МПК H02H 7 / 06, H02H 3 / 28 / Солдатов А. В., Антонов В. И., Наумов В. А., Иванов Н. Г.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью Научно-производственное предприятие “ЭКРА”. – № 2017115528; заявл. 02.05.2017; опубл. 22.06.2018, Бюл. № 18.
4. Soldatov, A. V. Informational fundamentals of the multiparameter differential protection of busbar generators against single line-to-ground faults [Text] / A. V. Soldatov, V. A. Naumov, V. I. Antonov // Power Technology and Engineering. – 2020. – Vol. 54. – No. 1. – P. 111 – 118. – (DOI: 10.1007 / s10749-020-01177-z).
5. Лихачев, Ф. А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией ёмкостных токов [Текст] / Ф. А. Лихачев. – М.: Энергия. – 1971. – 152 с.
6. Шуин, В. А. Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6 – 10 кВ [Текст] / В. А. Шуин, А. В. Гуменков // Энергетик. – 2001. – 104 с.
7. Petersen, W. Der ansetzende (intermittierender) Erdschluss [Text] / W. Petersen // ETZ. – 1917. – № 47. – S. 553 – 555.
8. Petersen, W. Der ansetzende (intermittierender) Erdschluss [Text] / W. Petersen // ETZ. – 1917. – № 48. – S. 564 – 566.
9. Peters, J. F. Voltages Induced by Arcing Grounds [Text] / J. F. Peters, J. Slepian // American Institute of Electrical Engineers. – 1923. – № 8. – P. 781 – 792.
10. Беляков, Н. Н. Исследование перенапряжений при дуговых замыканиях на землю в сетях 6 и 10 кВ с изолированной нейтралью [Текст] / Н. Н. Беляков // Электричество. – 1957. – № 5. – С. 31 – 36.
11. Аль-Хомиди, М. С. Оценка чувствительности токовых защит от замыканий на землю в кабельных сетях 6 – 10 кВ [Текст] / М. С. Аль-Хомиди, О. А. Добрягина, Е. С. Шагурина [и др.] // Вестник ИГЭУ. – 2016. – Вып. 3. – С. 50 – 55.
12. Халилов, Ф. Х. Защита сетей 6 – 35 кВ от перенапряжений [Текст] / Ф. Х. Халилов, Г. А. Евдокунин, В. С. Поляков [и др.]. – СПб.: Энергоатомиздат. – 2002. – 268 с.
13. Воробьева, Е. А. Совершенствование принципов выполнения адаптивных токовых и адмитанских защит от замыканий на землю в кабельных сетях 6 – 10 кВ [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Воробьева Екатерина Андреевна. – Иваново, 2018. – 20 с.
14. Устройство адаптивной защиты от однофазных замыканий на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией ёмкостных токов [Текст]: пат. 2629375 Рос. Федерация, МПК H02H 3 / 16 (2006.01) / Шуин В. А., Шадрикова Т. Ю., Добрягина О. А., Шагурина Е. С., Пашковский С. Н.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью Научно-производственное предприятие “ЭКРА”. – № 2016133784; заявл. 17.08.2016; опубл. 29.08.2017, Бюл. № 25.
15. Способ и устройство для определения неустойчивого замыкания на землю [Текст]: пат. 2358273 Рос. Федерация, МПК G01R 31 / 08 (2006.01) / Мякин О.; заявитель и патентообладатель АББ ОУ. – № 2006112901 / 28; заявл. 21.10.2004; опубл. 10.06.2009, Бюл. № 16.
16. Способ формирования контролируемого сигнала для цифровой защиты от замыканий на землю при перемежающемся дуговом замыкании [Текст]: пат. 2716235 Рос. Федерация, МПК H02H 3 / 16 (2006.01), СПК H02H 3 / 16 (2019.08); G01R 31 / 02 (2019.08) / Кудряшова М. Н., Антонов В. И., Наумов В. А., Солдатов А. В., Иванов Н. Г.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью Научно-производственное предприятие “ЭКРА”. – № 2019134983; заявл. 31.10.2019; опубл. 10.03.2020, Бюл. № 7.
17. Кудряшова, М. Н. Новые методы повышения устойчивости функционирования защит от перемежающихся дуговых замыканий [Текст] / М. Н. Кудряшова, В. И. Антонов, А. В. Солдатов [и др.] // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности: материалы 3-й Международ. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. – С. 184 – 187.
18. Попов, И. Н. Релейная защита, основанная на контроле переходных процессов [Текст] / И. Н. Попов, В. Ф. Лачугин, Г. В. Соколова. – М.: Энергоатомиздат. – 1986. – 248 с.
19. Антонов, В. И. Адаптивный структурный анализ электрических сигналов: теория для инженера [Текст] / В. И. Антонов, В. А. Наумов, М. Н. Кудряшова [и др.] // Релейная защита и автоматизация. – 2019. – № 2(35). – С. 18 – 27.

20. *Солдатов, А. В.* Методы распознавания высших гармоник на фоне доминирующего гармонического шума для целей защиты от однофазного замыкания на землю [Текст] / А. В. Солдатов, М. Н. Кудряшова, В. И. Антонов [и др.] // Электрические станции. – 2021. – № 7. – С. 27 – 34.
21. *Кудряшова, М. Н.* Нелинейное аналоговое преобразование входного сигнала в алгоритмах идентификации перемежающегося дугового замыкания [Текст] / М. Н. Кудряшова, В. А. Наумов, В. И. Антонов [и др.] // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы 13-й Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. – С. 328 – 330.
22. *Кудряшова, М. Н.* Преобразование сигналов в алгоритмах выявления перемежающегося дугового замыкания в электрической сети [Текст] / М. Н. Кудряшова, В. А. Наумов, А. В. Солдатов [и др.] // Сборник докладов научно-технической конференции молодых специалистов “РЕЛАВ-ЭКСПО – 2019”. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. – С. 38 – 42.

25-Я МЕЖДУНАРОДНАЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА

АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОНИКА

22-Я МЕЖДУНАРОДНАЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА

ЭЛЕКТРОТЕХ. СВЕТ

5-8.04.2022

**г. Минск,
футбольный манеж,
пр-т Победителей 20/2**

При поддержке:
Министерства промышленности Республики Беларусь
Ассоциации промышленных энергетиков “БелАПЭ” 

ГЕНЕРАЛЬНЫЙ ИНТЕРНЕТ-ПАРТНЕР:
GENERAL INTERNET-PARTNER: 

ГЕНЕРАЛЬНЫЙ ИНФОРМАЦИОННЫЙ ПАРТНЕР:
GENERAL INFORMATION PARTNER: 

www.minskexpo.com

ЗАО МИНСКЭКСПО УНН 100094846

Организатор:
 **МИНСКЭКСПО**
220035, Минск, Беларусь
ул.Тимирязева, 65
тел: +375 (17)373 98 88
e-mail: sveta@minskexpo.com